



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MOŽNOSTI UPLATNĚNÍ MODERNÍCH METOD PŘI VÝROBĚ PROTOTYPOVÝCH ODLITKŮ

POSSIBILITIES OF USING MODERN METHODS IN MANUFACTURING OF PROTOTYPE CASTINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUBOŠ NOVÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN HORÁČEK, CSc.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/12

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Luboš Novák

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Možnosti uplatnění moderních metod při výrobě prototypových odlitků

v anglickém jazyce:

Possibilities of using modern methods in manufacturing of prototype castings

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro urychlení komunikace mezi výrobcem součástí (odlitků) a odběratelem je v dnešní době nezbytné zkrácení doby mezi poptávkou a předložením prototypové součásti. Úkolem práce je jednak vypracovat literární rešerši zaměřenou na současné metody rychlého prototypování (RP) používané ve světě ve spojitosti s výrobou prototypových odlitků, ale především provést příslušné experimenty s vybranou metodou RP v podmínkách laboratoří ÚST, případně slévárny pracující s technologií vytavitelného modelu.

Cíle bakalářské práce:

Přehled metod RP používaných v současnosti pro zhotovení prototypových odlitků a optimalizace zvolené technologie RP ověřením při experimentech.

Seznam odborné literatury:


1. BEELEY, P.-R., SMART, R.-F. Investment Casting. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0 901716 66 9.
2. DOŠKÁŘ, J., GABRIEL, J., aj. Výroba přesných odlitků. Praha: SNTL, 1976. 315 s. DT 621.746.
3. CAMPBELL, J. Castings. Oxford: Butterworth – Heinemann, 1991. 288 p. ISBN 0 7506 1072.
4. OTI, JA. The Science, Mechanics and Construction of Investment Casting Tooling without Rework. In: Proceedings of the 50th ICI Conference. Chicago, 2002, p. 85-96.
5. WIMPENNY, D. RP – a route to rapid castings. In: Proceedings of the 11th World Congress on Investment Casting. Edinburgh, 2004, p. 120-135.


Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.


prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan



ABSTRAKT

Rychlé prototypování je soubor technologií použitelných při výrobě a vývoji prototypových odlitků. Je to prostředek pro zrychlení a zlevnění výroby prototypu, případně pro přípravu výroby menší série odlitků. Bakalářská práce je zaměřena na přehled těchto výrobních postupů a technologií.

KLÍČOVÁ SLOVA

Slévárnictví, Rychlé prototypování, Stereolitografie, Vytavitelný model, 3-D tisk, Trvalý model, Netrvalý model, Trvalá forma, Netrvalá forma

ABSTRACT

Rapid prototyping is a set of technologies applicable to the production and development of prototype castings. It is a means for accelerating and cheaper prototyping, or for the preparation of small series production of castings. The thesis is focused on some of these production processes and technologies.

KEYWORDS

Foundry industry, Rapid Prototyping, Stereolithography, Lost wax, 3D-printing, Permanent pattern, Nonpermanent pattern, Permanent mould, Nonpermanent mould



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOVÁK, L. *Možnosti uplatnění moderních metod při výrobě prototypových odlitků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 40 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Milan Horáček, Csc.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Možnosti uplatnění moderních metod při výrobě prototypových odlitků* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou uvedeny v seznamu na konci této práce.

V Brně dne 9. října 2012

.....

Luboš Novák



PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto prof. Ing. Milanu Horáčkovi, Csc. za cenné rady a připomínky při zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu během celého studia.



OBSAH

Úvod	9
1 Rapid prototyping	10
1.1 Pre-processing	11
1.2 Processing	11
1.3 Post-processing	11
1.4 Rapid prototyping ve slévárenství	12
2 Výroba forem	13
2.1 Výroba netrvalých forem	13
2.1.1 Výroba pískových forem laserovým slinováním - SLS	13
2.1.2 Výroba pískových forem metodou 3D tisku - DSPC	16
2.1.3 Metoda lití na vytavitelný model - Lost Wax	17
2.1.4 Metoda lití na spalitelný model - Full mold	19
2.1.5 Metoda lití na spalitelný model - Lost foam	20
2.1.6 Metoda lití na vypařitelný model - Replicast	21
2.2 Výroba trvalých forem	22
2.2.1 Výroba trvalých forem laserovým slinováním - DMLS	22
2.2.2 Přidávání materiálu metodou Laser Engineered Net Shaped	24
2.2.3 Povlakování kovem - Metal spray tooling	25
3 Výroba modelů	26
3.1 Výroba netrvalých voskových modelů	26
3.1.1 Přímá výroba voskových modelů metodou - MultiJet Modelling (MJM)	26
3.1.2 Výroba vytavitelného modelu stereolitografií - metoda QuickCast	27
3.1.3 Výroba voskového modelu pomocí silikonové formy	28
3.1.4 Výroba pryskyřicových forem pro výrobu voskových modelů	29
3.1.5 Výroba spalitelných modelů vyrobených metodou FDM	30
3.2 Výroba netrvalých modelů polystyrenových	31
3.2.1 Výroba polystyrenového modelu laserovým slinováním - PrimeCast	31
3.3 Výroba trvalých modelů	32
3.3.1 Výroba trvalých modelů metodou Laminated Object Manufacturing	32
3.3.2 Výroba trvalých modelů metodou FDM	33
Závěr	34
Použité informační zdroje	35
Seznam použitých zkratk	39
Seznam obrázků	40



ÚVOD

Slévárnictví je jednou ze stěžejních technik zpracování kovů. S výrobky, některé ze slévárenských technologií, se v životě každodenně setkáváme. I když to na první pohled není znát, nachází se téměř pořád v naší blízkosti. Odlitky lze nalézt v automobilech, letadlech a jiných dopravních prostředcích, na ulici jsou odlitky v podobě kanálových vík, kašen, soch, různých armatur inženýrských sítí apod.. V podstatě každé odvětví lidské činnosti, přímo, nebo nepřímo, využívá slévárenské produkty. Existují však obory, ve kterých se slévárnictví využívá relativně krátkou dobu. Jako příklad lze uvést lékařský obor kloubních náhrad.

S postupným vývojem výpočetní techniky, materiálových věd, a dalších průmyslových oblastí, začaly být na slévárnictví kladeny požadavky na rychlejší výrobu, nižší náklady a pokud možno výrobu součástí "na hotovo". Tedy součásti s kvalitou povrchu a tvarovou a rozměrovou přesností na takové úrovni, aby nebyla nutná jejich další úprava. K dosažení těchto požadavků přispívá velkou měrou i použití technologií Rapid Prototyping.

Metody Rapid Prototyping se velkou měrou podílejí na zjednodušení výroby hlavně geometricky komplikovaných součástí vyráběných jako prototyp, nebo jako několika kusová série. Své místo však nacházejí i v přípravě velkosériové výroby. Větší či menší měrou zasahují, technologie Rapid Prototyping, do většiny slévárenských odvětví.



Obr. 1 Příklady možností technologií Rapid Prototyping[1][2][3]



1 RAPID PROTOTYPING

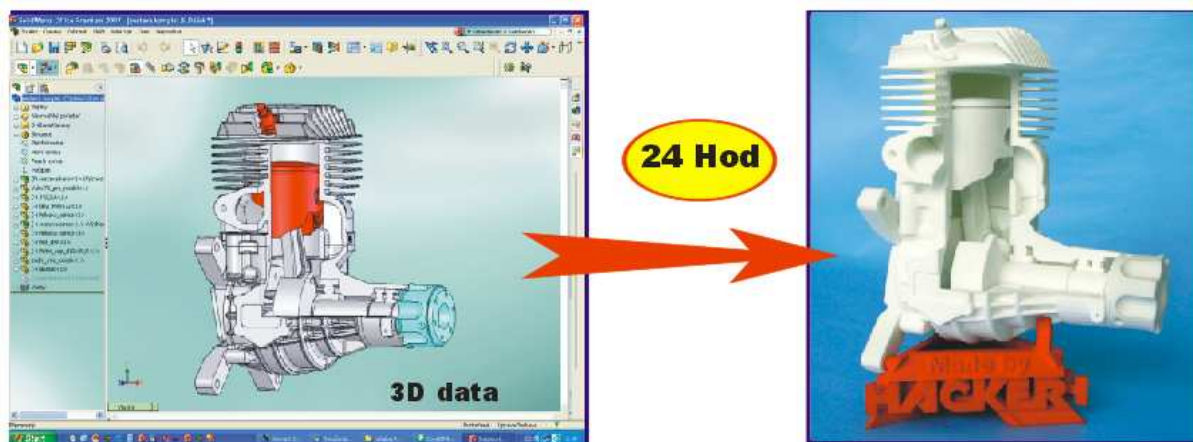
Rapid Prototyping, neboli rychlá výroba prototypu, je výrobní odvětví specializující se úzce na produkci prototypových součástí, nebo na výrobu originálních, plně funkčních, součástí (v množství do několika kusů) a výrobu výrobního zařízení (vstřikovací formy, nářadí, atd..) Jednotlivé segmenty vyráběných součástí jsou také označovány jako: Rapid Prototyping - výroba prototypů, či modelů, Rapid Manufacturing - výroba funkčních součástí, pro okamžité použití a Rapid Tooling - výroba nástrojů např. vstřikovací formy.

Rapid Prototyping je soubor, na sobě nezávislých, výrobních metod, s přímým využitím elektronických konstrukčních dat. Objekt zkonstruovaný (vymodelovaný) v některém 3D konstrukčním programu, jako například AutoCAD, SolidWorks, Catia, a jiné, je převeden do společného datového formátu .STL, odlazen a následně vyroben některou z metod Rapid Prototyping. V závislosti na konkrétní metodě, jsou po vytvoření modelu provedeny dokončovací práce (zpevnění lakem, vypálení, atd..). V mnoha případech ale není nutné hotovou součást dále upravovat.

Přesto, že se od sebe různé metody značně liší, ať už stavebním materiálem, způsobem jeho vytváření, či samotným výrobním procesem, jsou založeny na několika principech společných všem metodám. Jedním z těchto principů je stavba objektu přidáváním materiálu, tedy opak klasických výrobních metod, kdy je materiál odebrán. Dalším společným znakem je způsob nanášení materiálu vrstvu po vrstvě. Vrstvy mají konstantní tloušťku (do 0,2mm, ale obvykle i tenčí). Po vytvoření jedné vrstvy (průřezu), klesne pracovní stůl o nastavenou tloušťku vrstvy a následuje výroba další vrstvy. [4][5][6]

ZÁKLADNÍ FÁZE VZNIKU FYZICKÉHO MODELU Z VIRTUÁLNÍCH DAT JSOU:

- Pre-processing
- Processing
- Post-processing



Obr. 2 Model součásti ze 3D dat lze vyrobit za 24 hodin [7]



1.1 PRE-PROCESSING

Jako přípravné práce (preprocessing) představují "mezikrok" mezi 3D CAD modelem a samotnou výrobou. V této fázi je digitální model převeden do formátu STL (Stereolithography Tessellation Language). STL je základní komunikační formát mezi CAD/CAM systémy a systémy Rapid Prototyping z nichž většina s tímto formátem pracuje. Převod do STL formátu podporuje většina dostupných CAD/CAM systémů (SolidWorks, Catia, atd.). Konverzí do tohoto formátu je model pokryt virtuální trojúhelníkovou sítí pro popis geometrie modelu. Následně je v programu určeném pro úpravu STL formátu zpracován, při zpracování jsou opraveny případné chyby modelu. Dále dochází k orientaci modelu na základní plochu a rozdělení modelu na horizontální průřezy. Pokud to tvar a složitost součásti vyžadují, jsou generovány podpůrné konstrukce, tak aby se model během stavby nezbortil. Tyto operace provádí obvykle příslušný software, který je dodáván se zařízením pro výrobu prototypových modelů. V závislosti na specifických požadavcích má obsluha možnost upravovat tato nastavení, např.: změnit orientaci modelu k podložce tak, aby měla v určitém směru požadované mechanické vlastnosti.[6]

1.2 PROCESSING

V této fázi je součást již přímo vyráběna. V pracovním zařízení probíhá cyklická stavba součásti, ve sledu operací: načtení příslušného průřezu, rozprostření pracovní látky, její vytvrzování, vyřezávání, či spojování pojivem, následuje snížení pracovní plochy o tloušťku vrstvy a načtení dalšího průřezu. Takto se cyklus opakuje až do dokončení modelu. Zařízení obvykle pracují zcela automaticky, není tedy nutná asistence odborné obsluhy, po celou dobu výrobního procesu. Výrobní proces je poměrně časově náročný, v řádech hodin až desítek hodin. Délka výroby, závisí na velikosti součásti a její geometrické složitosti.[8]

1.3 POST-PROCESSING

Post-processing neboli dokončovací fáze je posledním krokem při zhotovení dané součásti či modelu. Významná část dokončovacích úkonů je prováděna ručně, obsluhou. Jedná se o poměrně odpovědnou činnost, protože v mnoha případech není hotová součást stále ještě plně vytvrzena, a je tudíž náchylná k poškození. Větší riziko poškození představují zejména součásti s komplikovanou geometrií a drobnými detaily. Pro různé metody se užívají různé dokončovací práce a to v závislosti na principu výroby, stavebního materiálu nebo využití zhotovené součásti. Obecně je do post processingu zahrnuto vše co se děje po zastavení stroje. To znamená, že je do něj zahrnuto odstranění nepoužitého materiálu a očištění součásti. Podle příslušné metody je odstranění nepoužitého materiálu realizováno odsáváním prášku (DMLS), případně odstraněním tekutého polymeru z dutin (SLA). Způsob konečného vytvrzení závisí na typu metody Rapid Prototyping např.: UV zářením, nebo vypálením v peci. Další dokončovací operace se mohou provádět pro zvýšení kvality povrchu, tj. kytování, broušení, leštění, lakování. Do post-processingu je samozřejmě zahrnuto obrobení funkčních ploch. [8]



1.4 RAPID PROTOTYPING VE SLÉVÁRENSTVÍ

Využití technologií Rapid Prototyping ve slévárenských aplikacích značně zvyšuje konkurenceschopnost slévárenství v oblasti výroby funkčních součástí. Slévárenství bylo dříve bráno jako obor vyrábějící pouze polotovary. Avšak, s rozvojem a využitím technologií Rapid Prototyping, je slévárenství schopno produkovat hotové, nebo téměř hotové součásti. U kterých je třeba provést pouze úpravu funkčních ploch, případně povrchovou úpravu. Využitím technologií pokročilých metod výroby modelů je výrazně zvýšena rozměrová přesnost a kvalita povrchu vyráběných součástí. Zároveň je zkrácena doba potřebná pro přípravu výroby. Zejména je zkrácena doba nutná na výrobu modelového zařízení a výrobu forem. Díky zkrácení této doby z řádu několika měsíců na řádově dny až desítky dnů, je umožněna pružná reakce na poptávku.



2 VÝROBA FOREM

2.1 VÝROBA NETRVALÝCH FOREM

Netrvalou formu lze charakterizovat jako formu na jedno použití. Z takovéto formy nelze vyjmout odlitek bez jejího poškození. Do kategorie netrvalých forem jsou řazeny více dílné pískové formy pro rámové a bez rámové lití, jednoduché pískové a skořepinové formy využívané metodou přesného lití a metodami lití na spalitelný (vypařitelný) model. Do této kategorie lze zařadit i tzv. polotrvalé formy, jedná se o formy umožňující odlít více kusů po sobě. Po vyjmutí odlitku je forma zkontrolována, případně opravena a znovu použita. Toto řešení, je ale podmíněno tvarovou složitostí (resp. jednoduchostí) a rozměry součásti, aby bylo použití polotrvalé formy časově a nákladově efektivní.

2.1.1 VÝROBA PÍSKOVÝCH FOREM LASEROVÝM SLINOVÁNÍM - SLS

Metoda SLS (Selective Laser Sintering) je založena na principu spékání vrstvy prášku laserovým paprskem. Jako jedna z mála, je schopna zpracovat různé materiály a vytvářet z nich fyzické modely a součásti. Materiál použitý pro tuto technologii musí být tepelně tavitelný, nebo alespoň natavitelný. Při splnění této podmínky je možné použít jakýkoli materiál, pro stavbu součástí, jako např.: plasty, kovy, písek, atd. Při přípravě je materiál namlet na velmi jemný prášek a roztřizen dle jemnosti, aby byla zaručena homogenita směsi. Určitým omezením je nemožnost kombinace materiálů během výroby jedné součásti, neboť různé materiály mají různé podmínky pro tavení a zpětné vytvrzení.

Zde uváděná varianta je zaměřena na výrobu slévárenských forem, jejichž materiálem je křemičitý písek. Přímoou cestou jsou tak vyráběny pískové skořepinové formy, které jsou vlastně negativním obrazem vůči budoucímu odlitku. Model odlitku existuje v době výroby formy pouze jako virtuální 3D model. Na obrázku č.3 jsou vyobrazeny slinované pískové formy včetně jader.



Obr. 3 Příklad pískové formy vyrobené laserovým slinováním[3][10]

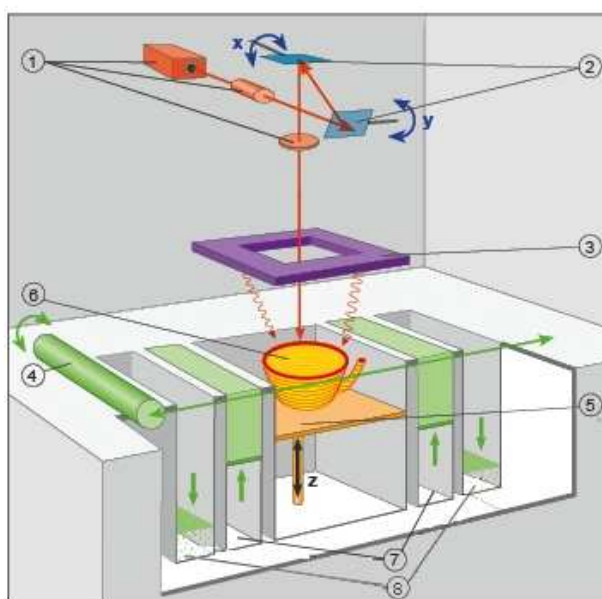


Výrobní proces laserového slinování se skládá z cyklického opakování následujících operací. Pracovní píst klesne o zadaný přídavek. Nad úroveň vodorovné desky stolu je vytlačena dávka materiálu. Tento materiál je pomocí přítlačného válce rozprostřen a pomocí laserové paprsku je provedeno spékání daného průřezu. Po dokončení vrstvy je pracovní píst opět snížen o nastavenou tloušťku. Celý cyklus operací se takto opakuje, vrstvu po vrstvě, až do úplného dokončení součásti.

Schéma pracovního zařízení je zobrazeno na obrázku č.4. Zařízení se skládá z laserového zdroje, optického systému, topného tělesa, přítlačného válce, stavebního pístu, zásobníků materiálu a zásobníků na nepoužitý materiál. Celý pracovní prostor je uzavřená komora s inertní atmosférou. Jako inertní atmosféra bývá použit dusík, nebo argon.

Jako zdroj tepelné energie slouží laserový paprsek. Většinou je použit CO₂ laserový zdroj o výkonu od 50W do 200W, výkon však může být i vyšší. Na obrázku č.4 je laserový zdroj označen pozicí 1. Optický systém skládající se ze soustavy optických čoček a zrcátek, zajišťuje pohyb laserového paprsku, čímž je umožněno "vykreslovat" požadované tvary, tak jak je vyobrazeno na pozici č.2. Zařízení dále obsahuje topné těleso, které zajišťuje vyhřívání pracovní komory, pro zajištění optimálních podmínek. Pozice č.4 označuje přítlačný válec, kterým je rozprostírána vrstva práškového materiálu. Jako č.5 je označen pracovní píst a prostor nad pracovním pístem, v tomto prostoru je rozprostírána vrstva prášku. Zde je do této vrstvy prášku vypalován příslušný průřez součásti. Tepelně neovlivněný materiál není odstraňován a zůstává jako podklad pro další vrstvu a zároveň slouží jako podpůrná konstrukce pro vytvářenou součást. Nepoužitý materiál není v obrázku nakreslen, aby byla vidět samotná součást, pozice č.6.

Přídavek potřebného množství prášku zajišťují pístové zásobníky po stranách stavební komory, pozice č.7. V závislosti na pozici přítlačného válce (vpravo, nebo vlevo) je materiál přidán pístem, který je blíže k válci. Před samotným rozprostřením materiálu se pracovní píst posune o požadovanou tloušťku vrstvy pod úroveň vodorovné desky stolu, vznikne tak snížené lůžko pro položení nové vrstvy. Válec pak hrne dávku materiálu před sebou a vyplňuje jím vzniklý prostor, zároveň materiál pěchuje.



Obr. 4 Principiální schéma metody SLS[9]



Nevyužitý prášek je odklizen do sběrného zásobníku. Tyto zásobníky jsou označeny jako pozice č.8.

Po dokončení pískové formy, je již mimo zařízení prosycena roztokem křemičitanu sodného a cca 2 hodiny vytvrzována za zvýšené teploty cca 200°C. Tím je zvýšena celková pevnost formy a forma připravena k lití. Jako materiály pro výrobu pískových forem jsou používány směsi písků na bázi křemíku a zirkonu a pojiva na bázi fenolových pryskyřic. Používány jsou také keramické směsi na bázi alumino-silikátového písku a fenolových pryskyřic. Příkladem mohou být materiály Ceramics 5.2 a Quartz 4.2 / Quartz 5.7, které jsou vyráběny firmou EOS.

Využitím současných zařízení lze vyrábět součásti, nebo formy o rozměrech cca 700x380x380mm (d x š x v), tloušťka vrstvy materiálu je maximálně 0,2mm a přesnost plošných rozměrů je $\pm 0,05$ mm. Uváděné rozměry jsou různé dle konkrétního typu a výrobce, lze také předpokládat že se budou postupným vývojem měnit. Vývoj je v současnosti směřován zejména na práškové materiály. Vývojem postupů, materiálů a zařízení pro laserové slinování se zabývají například firmy EOS, 3D SYSTEMS, SolidConcept, a jiné. [8][10][11]



2.1.2 VÝROBA PÍSKOVÝCH FOREM METODOU 3D TISKU - DSPC

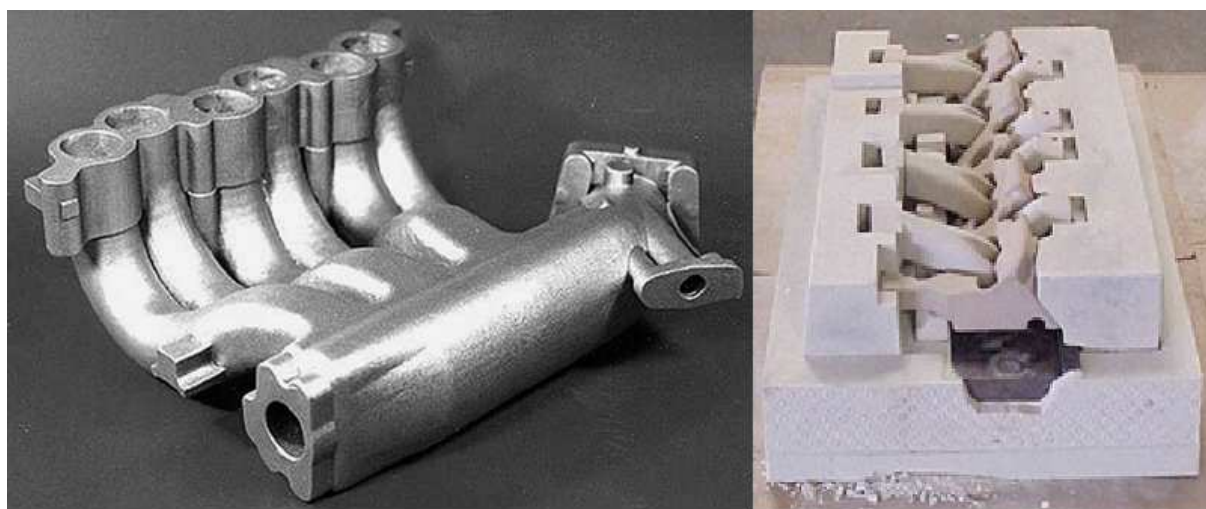
Metoda Direct shell production casting slouží pro přímou výrobu keramických skořepinových forem pro odlévání kovových součástí. Výroba probíhá automaticky z dat 3D CAD modelu, není tudíž vyžadována žádná výroba formovacího a modelového zařízení. Touto metodou jsou vyráběny obdobné pískové skořepiny jako v případě metody SLS, jejich vznik je však založen na principu 3D tisku (Three Dimensional Printing). Tedy na principu klasické inkoustové tiskárny s tím rozdílem, že je tisknuto tekutým pojivem a ne na papír, ale na vrstvu práškového materiálu.

Na začátku výroby součásti je vytvořen její virtuální model v některém 3D softwaru (SolidWorks, Catia). Následně jsou data přenesena do ovládací jednotky systému, nazývané SDU (Shell Design Unit), kde obsluha zařízení doplní model o vtokovou soustavu a zaktualizuje datovou složku, případně pozmění orientaci modelu vůči pracovní ploše. Dodefinovaný, ustavený model je následně programově rozložen na průřezy vodorovné s pracovní plochou s konstantní tloušťkou. Tloušťka průřezu odpovídá tloušťce vrstev prášku a kroku posuvu pracovní plochy

Na začátku výroby skořepiny je po pracovní ploše rozprostřena vrstva velmi jemného prášku z čistého oxidu hlinitého, následně je válcem zarovnán povrch práškové vrstvy. V další fázi je tiskovou, případně vícetryskovou hlavou (Multi-Jet printhead) nanášeno pojivo do oblastí korespondujících s daným průřezem modelu součásti. Po dokončení vrstvy je pracovní podložka posunuta o zvolenou tloušťku níže a celý proces se opakuje, až do vytištění celé skořepiny.

Po dokončení tisku je skořepina očištěna od zbylého nespojeného prášku a je dále přemístěna k dokončovací práci (post-processing). Zde je zahrnuto přemístění do vypalovací pece k vysušení skořepiny a finálního vytvrzení, pro zvýšení pevnosti formy.

Předehřátím je keramická skořepina připravena k nalití tekutého kovu. Po vychladnutí je, keramická forma rozbita a odstraněna, pro vyjmutí modelu. Z odlitku je odříznuta vtoková soustava, nálitky a odlitek je začištěn. Tímto je celý proces u konce. Dle přání zákazníka může být součást povrchově upravena např. nátěrem, nebo mohou být obrobena funkční plochy. [8][12]



Obr. 5 Ukázka pískové formy vyrobené metodou DSPC a výsledné součásti[13][14]



2.1.3 METODA LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL - LOST WAX

Tento slévárenský postup je také znám pod názvy přesné lití (Investment casting) resp. ztracený vosk (Lost wax). Postup je využíván již od dob starověkého Egypta, tehdy pro výrobu přesných a tvarově složitých šperků, dnes pro velkosériovou výrobu průmyslových součástí různých velikostí. Do popředí zájmu se tato slévárenská metoda dostala ve čtyřicátých letech dvacátého století. Velkou výhodou metody jsou velmi přesné součásti s vlastnostmi povrchu nevyžadujícími další opracování. Nutnost obrobení je tedy minimalizována pouze na nejnужnější úpravu funkčních ploch. Velkými odběrateli jsou například automobilový a letecký průmysl.

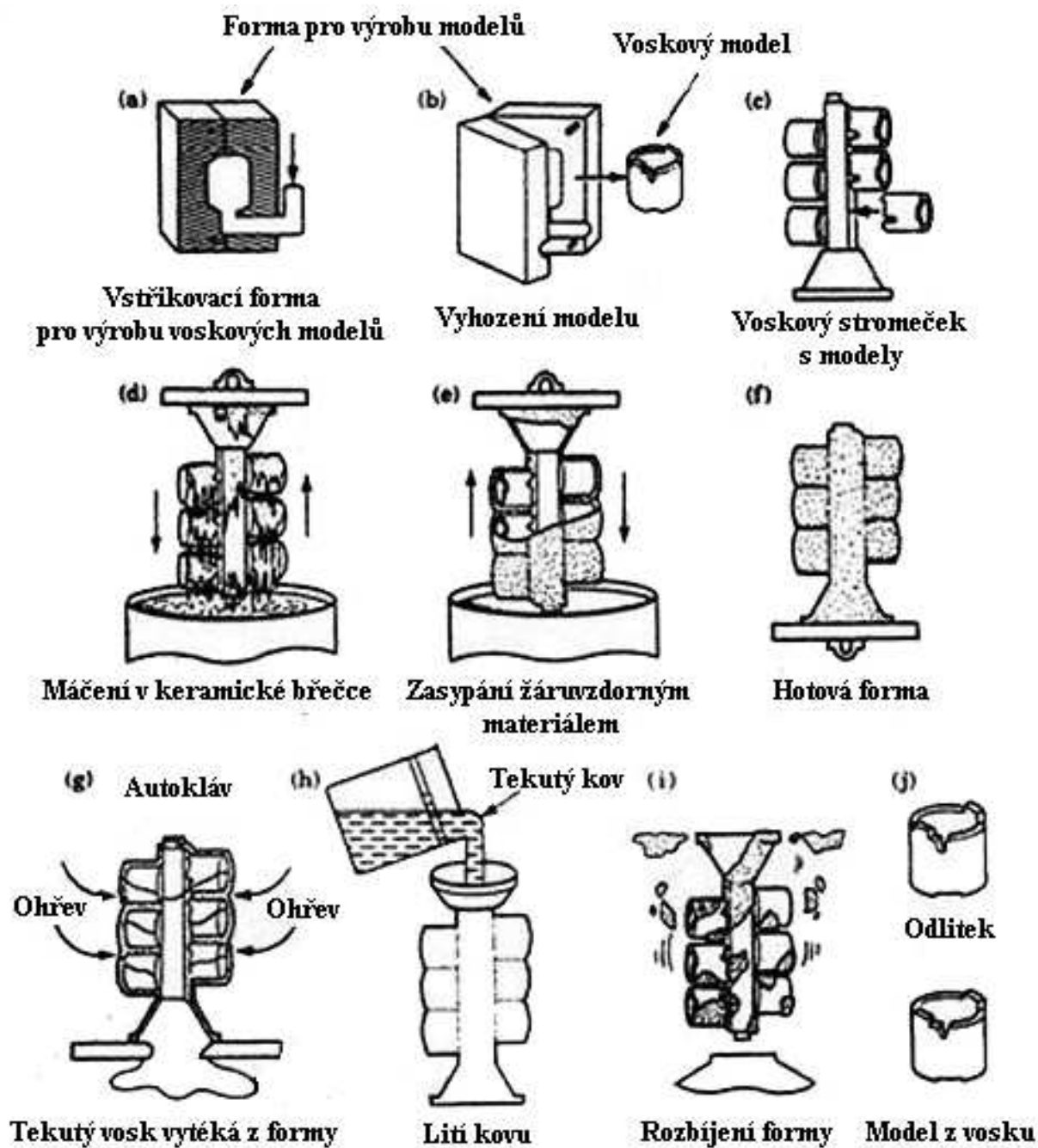
Výsledný odlitek přesného lití je svojí kvalitou do značné míry závislý na kvalitě použitého modelu pro formování. V současnosti jsou převážně používány modely voskové, podle sériovosti vyráběné různými způsoby. Pro velké série jsou obvykle vyráběny na vstřikolisových permanentních formách, ty jsou obvykle vyráběny konvečními metodami, z různých kovových materiálů. Pro kusovou a malosériovou jsou voskové modely připravovány mnoha způsoby, v závislosti na množství a složitosti. Ve výrobě voskových modelů jsou stále hledány cesty pro co nejlevnější a nejrychlejší výrobu. Při přípravě voskových modelů jsou často využívány technologie Rapid Prototyping, a to jak k přímé, tak k nepřímé výrobě. Z důvodů zrychlení výroby prototypových odlitků, jsou vyvíjeny metody, kdy je zaformován přímo speciální stereoligrafický model např.: QuickCast. Ten má podobné vlastnosti jako model voskový a po zaformování je z formy vytaven.



Obr.6 Ukázka odlitků přesného lití[15]

Na začátku tohoto procesu je zhotoven voskový model odlévané součásti. Výroba voskového modelu obvykle probíhá tak, že tekutý vosk je vstříknut do kovové formy. Po zhotovení požadovaného množství modelů jsou tyto zkompletovány se vtokovou soustavou, takže tvoří jeden celek. Následuje fáze vytvoření keramické formy. Kompletní model s vtokovou soustavou je namočen do keramické břečky a pak obalen v keramickém prášku, toto se opakuje tak dlouho dokud tloušťka keramické vrstvy nedosahuje 6-8mm. Následně je forma vysušena a poté přemístěna do parního autoklávu. Nahřáním je rozpuštěn voskový model uvnitř keramické formy tak, aby ho co největší množství mohlo z formy vytéci. Následuje vypalování skořepiny v peci, čímž se zvýší samotná pevnost skořepiny a zároveň jsou odstraněny zbytky vosku nasáklé do vnitřních stěn skořepiny. Tímto je forma hotova a po předehřátí je možné do ní odlévat tekutý

kov. Po dostatečném zchladnutí kovu ve skořepině je keramika otlučena a následuje oddělení odlitků od vtokové soustavy. Dále pak jejich kvalitativní přetřídění. Následuje případné obrobení funkčních ploch. Postup výroby skořepinové formy je zobrazen na obrázku č.7. [15][16][17]



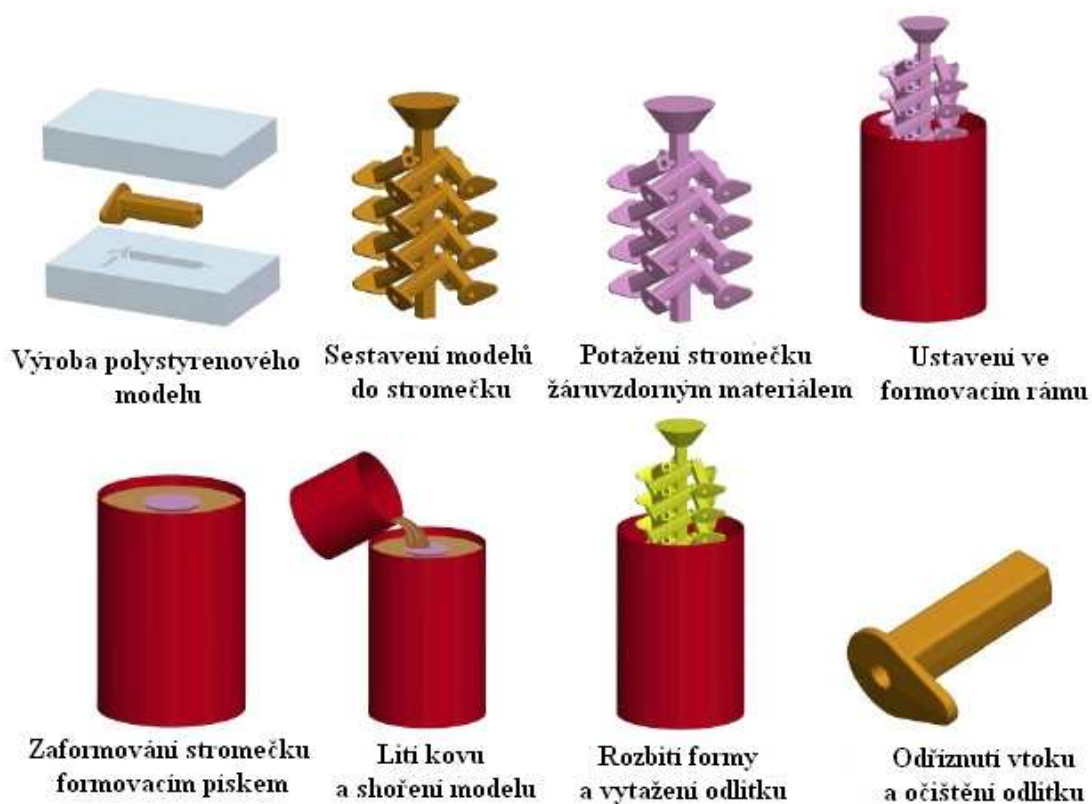
Obr. 7 Schéma procesu přesného lití [18]

2.1.4 METODA LITÍ NA SPALITELNÝ MODEL - FULL MOLD

Metoda Full Mold (plná forma) využívá namísto dřevěných či voskových modelů modely polystyrénové. Metoda je podobná metodě vytavitelného vosku, rozdíl je v tom že polystyrénový model je z dutiny formy odstraněn vypařením (vyhořením), až při samotném procesu odlévání, kdy při styku s tekutým kovem dojde k jeho vypaření. To znamená, že po zaformování je forma plná, proto Full Mold.

Polystyrénový model je vyroben ručně nebo strojně z polystyrénového bloku, pro malé množství, velké série modelů jsou vyráběny vstříknutím polystyrénového polotovaru do formy a následným expandováním pomocí páry. Při výrobě formy pro vstřikování polystyrenu je užíváno metod Rapid Prototyping. Model je následně opatřen vtokovou soustavou, která je rovněž z polystyrenu.

Samotné formování probíhá tak, že je model namočen do keramické břčky, čímž vznikne keramický potah, který chrání formu před vymíláním při odpařování polystyrenu. Formování probíhá do pískové směsi, s použitím umělých pryskyřic jako pojiv. Zaformováním vzniká jednoduchá plná forma. Výhodou metody je, že není třeba řešit úkosy na modelu, protože po zaformování ho není třeba z formy vytahovat. Touto metodou jsou odlévány měděné, hliníkové a niklové slitiny, oceli i litiny. Je vhodná pro odlévání komplexních součástí se složitou geometrií, např.: skříňe elektromotorů, armatury, atd.. Metoda je vhodná jak pro malé, tak i pro větší série. Největší přednosti této metody se projevují při kusové výrobě rozměrných součástí, kdy je výhodou jak nízká cena, tak i nízká hustota polystyrenu. Ta usnadňuje manipulace s objemnými modely.[19][20]



Obr. 8 Schéma lití na spalitelný model, metody Full Mold a Lost Foam[21]

2.1.5 METODA LITÍ NA SPALITELNÝ MODEL - LOST FOAM

Metoda Lost Foam jinak také běžně známá jako metoda vypařitelného (spalitelného) modelu. podobně jako u metody Full mold se polystyrenový model vypaří během lití roztaveného kovu do formy. To znamená, že vznikne jednodílná polystyrenová forma bez dělicí roviny.

Samotný proces začíná výrobou polystyrénového modelu, malé množství modelů je vyráběno buď strojně nebo ručně, vyřezáním z pevného bloku polystyrenu. Jestliže je potřeba větší množství, jsou modely, ve velkých sériích, vyráběny na vstřikolisech. Zde je polystyrénový polotovar vstříknut nebo nasát do přehřáté hliníkové formy, následně je do formy vpuštěna pára, čímž polystyren expanduje. Expandovaný polystyren vyplní kompletně formu a vytvaruje se podle ní. Po ochlazení je model vyjmut z nástroje. Následně jsou na model přilepeny vtoková a výfuková soustava.

Kompletní polystyrénový model je namočen do keramické břechky, která chrání pískovou formu před poškozením při vypařování modelu při odlévání. Celá sestava modelu, s keramickým povlakem, je zaformována do pískové formy. Na rozdíl od metody Full Mold je zde použita písková směs bez pojiva. Písek je zhutňován metodou střešení na vibračním stole. Do takto připravené formy je možno přímo odlévat. Tato metoda je používána k výrobě odlitků z litin, ocelí, hliníkových slitin a měděných slitin.[22][23]



Obr. 9 Ukázka vzniku součásti metodou lití na spalitelný model, nahoře: polystyrénový model, uprostřed: odlitek se vtokem, dole: hotová součást[24]



2.1.6 METODA LITÍ NA VYPAŘITELNÝ MODEL - REPLICAST

Metoda Replicast je technologickou kombinací metod Lost Foam a Lost Wax, tedy metody využívající spalitelného modelu a metody využívající vytavitelného modelu. Model odlévané součásti je polystyrénový, stejně jako u metody Lost Foam. Na povrchu modelu je však v následující fázi vytvořena keramická vrstva, po jejímž zaschnutí je model přesunut do pece, kde dochází k vytvrzení keramické hmoty. Při teplotách kolem 1000°C také dochází k vypařování polystyrénového modelu. To je obdoba části procesu přípravy formy pro lití na vytavitelný model Lost Wax.

Hotová skořepina je pak umístěna do formovacího rámu, kde je zaformována pískovou směsí. Zhutnění směsi je dosaženo vibračním střešáním. V této fázi je forma připravena k odlévání.

Důvodem pro vývoj této technologie bylo odlévání nízkouhlíkových ocelí. Hořením modelu při odlévání, by mohlo docházet k nauhličování tekutého kovu a tím ke změnám v požadovaných vlastnostech oceli. Odstraněním modelu z dutiny skořepiny před samotným litím, byl problém nauhličování zcela odstraněn. [25]



2.2 VÝROBA TRVALÝCH FOREM

Pojmem "trvalá forma" jsou označovány ty formy, z nichž je odlitek vyjmut bez nutnosti jejího rozbití. Významnými představiteli užití trvalých forem je odvětví tlakového lití. Trvalé formy také představují kokily, používané v ocelárnách pro odlévání ingotů, tzn. ocelových bloků. Trvalá forma může být vyrobena mnoha způsoby. Konvenční, často používaná výroba pomocí CNC obrábění, je jednak časově náročná a do jisté míry limitovaná tvarovou složitostí, kdy ne vše je výrobitelné bez použití speciálního nářadí. Použití speciálního nářadí není vždy finančně rentabilní. Alternativa v podobě technologií Rapid Prototyping umožňuje výrobu i velmi složitých tvarů v relativně krátkém čase. A výsledné produkty jsou plně srovnatelné se součástmi obráběnými z bloku materiálu.

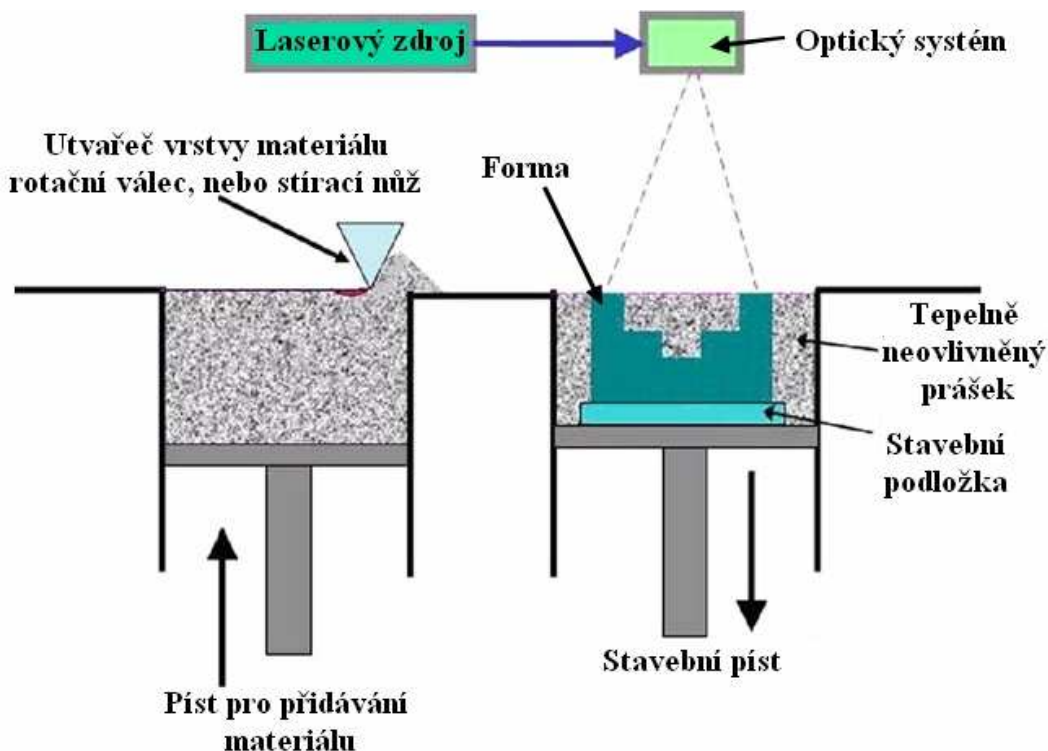
2.2.1 VÝROBA TRVALÝCH FOREM LASEROVÝM SLINOVÁNÍM - DMLS

Tato metoda patří do skupiny metod pracujících na principu laserového slinování práškového materiálu. V tomto případě kovových prášků. Spékáním kovového prášku jsou vyráběny součásti s 99.99% hustotou původního materiálu, to znamená že vyráběné součásti se svými mechanickými vlastnostmi velmi blíží k součástem vyrobeným klasickými metodami jako jsou obrábění, tváření, či odlévání. Na rozdíl od těchto způsobů výroby je využití metody DMLS jednodušší v tom, že je možné vyrábět v podstatě jakékoli tvary jako jeden kus. Při výrobě klasickými způsoby by bylo nutné použití (vyrobení), buď zvláštního nářadí, nebo zařízení, nebo úprava konstrukce vyráběné součásti, což znamená zvýšení nákladů. Náklady na výrobu nářadí jsou tím vyšší, čím nižší množství kusů je potřeba vyrobit. Náklady na výrobu jsou zvyšovány také geometrickou složitostí součásti. Čím více tvarově komplikovaných detailů je na součásti obsaženo, tím výhodnější je výroba pomocí DMLS. Další velkou výhodou je úspora času, kdy samotná produkce, i poměrně složité součásti, trvá několik desítek hodin. Tím je možné výrazně zkrátit čas na přípravu výroby součásti. Do výrobního rámce, této relativně mladé technologie, jsou zahrnuty jak samotné prototypové součásti, tak i produkce nářadí. Jako příklad lze uvést kovové formy pro vstřikolisovou výrobu, nebo trvalé modelové zařízení.



Obr. 10 Ukázka součástí vyrobených metodou DMLS[26]

Samotný proces probíhá v uzavřené komoře s inertní atmosférou. Zde je po kovové podložce rozprostřena vrstva kovového prášku, do kterého je laserovým paprskem "vykreslen" tvar příslušného průřezu součásti. Následně se platforma posune o tloušťku vrstvy níže a proces se opakuje. Jako zdroj tepelné energie je použit CO₂ nebo Ytterbium laserový paprsek o výkonu až 400W. Tímto je zajištěno dokonalé tavení kovového prášku a tedy dokonalé spojení částic. V případě, že to konstrukce součásti vyžaduje, je stavěna zároveň podpurná konstrukce. Ta zabraňuje jak zborcení samotného výrobku, tak jeho dokonalé ustavení a nehybnost na podložce.

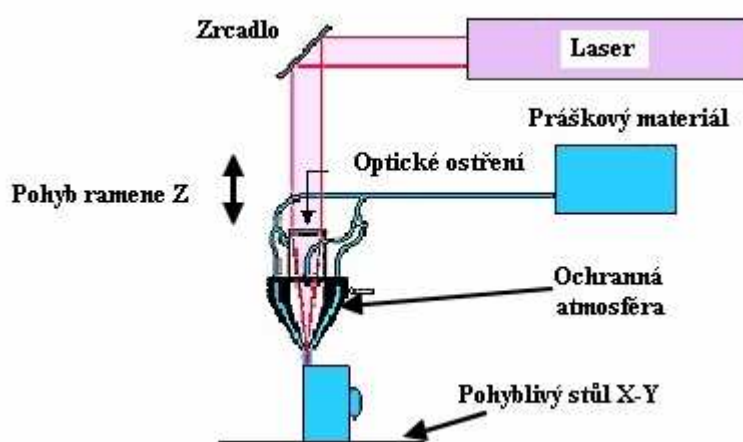


Obr. 11 Schéma metody DMLS[27]

Řízení pohybu paprsku po ploše, tak aby byla spečena pouze požadovaná místa, je zajištěn souřadnicovým systémem. Souřadnice pro řízení jsou generovány z 3D modelu dodaného zákazníkem. Souřadnice osy Z jsou realizovány posuvem stavebního stolu a mají konstantní hodnotu. Hodnota souřadnice Z je dána tloušťkou vrstvy. V případě zařízení EOSINT M 280 je minimální tloušťka 0,02mm. A při této hodnotě posuvu platformy je součást vyráběna s tvarovými tolerancemi $\pm 0,1\text{mm}$. [28][29]

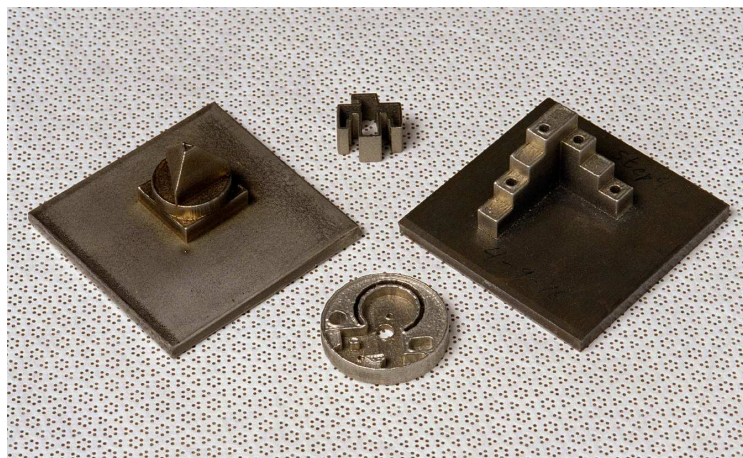
2.2.2 PŘIDÁVÁNÍ MATERIÁLU METODOU LASER ENGINEERED NET SHAPED

Výkonným laserem je taven práškový materiál, který je tryskán několika sbíhajícími se proudy, do místa původního materiálu, který laserovým paprskem taktéž taven. Princip této technologie je podobný principu svařování s přídavným materiálem. Oproti ostatním technologiím Rapid Prototyping, je v tomto případě pohyb v osách X,Y zajištěn posuvem pracovního stolu. Posuv v ose Z po dokončení vrstvy je pro změnu zajištěn pohybem ramena s laserem a tryskami. Aby bylo zamezeno negativním vlivům vzdušného kyslíku na roztavený kov, probíhá celý proces v inertní atmosféře. Výhodou této technologie je možnost použití prakticky jakéhokoli kovového materiálu. Výsledné součásti jsou vlastnostmi srovnatelné s klasicky obráběnými díly



Obr. 12 Schéma zařízení metody LENS[30]

Potenciál využití této metody, nejen ve slévárenství, je ve výrobě komplikovaných permanentních součástí forem, případně modelového zařízení. Další možnost využití této metody je v opravě poškozených součástí, forem, modelů, atd..[30][31]

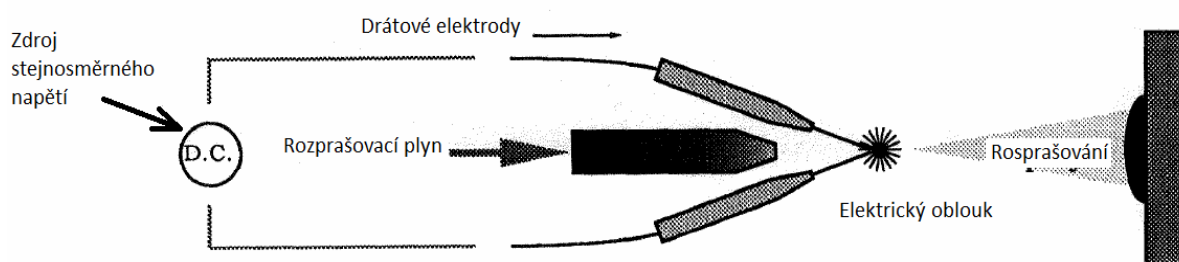


Obr. 13 Příklad dílů vyrobených metodou LENS[32]

2.2.3 POVLAKOVÁNÍ KOVEM - METAL SPRAY TOOLING

Metodou Metal Spray Tooling jsou vyráběny trvalé formy jsou používané převážně v plastikařském průmyslu. Tedy formy pro produkci voskových a polystyrénových modelů, využít je ale lze také jako formy pro tlakové odlévání nízko tavitelných kovových slitin.

Během procesu je nanášena zirkono/hliníková slitina na povrch předem vyrobené součásti. Aplikace je prováděna sprejovým nástřikem. Základní součást může být vyrobená některou jinou metodou Rapid Prototyping např. model: stereolitografický, dřevěný, plastický, kompozitový, či kovový. Slitina, která je nastříkávána na model, vytváří, po zaschnutí, na povrchu modelu skořepinu o tloušťce od 0,15-0,32mm. Po vytvrzení a přilnutí nastříkané kovové skořepiny k modelu, je dále vyztužena hliníkovou epoxidovou pryskyřicí, nebo zalita tekutým hliníkem, nebo jinou nízko tavitelnou kovovou slitinou. Hotová forma může sloužit k odlévání téměř jakéhokoli materiálu od polypropylenu až po polykarbonát. Životnost nástroje takto vyrobeného je závislá na procesu, kterým je nástroj využíván. Nízkotlaké aplikace jako jsou odlévání, či vyfukování, mají vyšší produktivitu na jeden nástroj než vysokotlaké procesy. Čas na výrobu nástroje metodou Metal Spray Tooling je v rozmezí cca deseti až dvaceti dnů, to je samozřejmě ovlivněno na složitosti nástroje [33]



Obr. 14 Metal spray tooling[34]



Obr. 15 Součást povrchově pokovená pomocí Metal Spray Tooling[35]

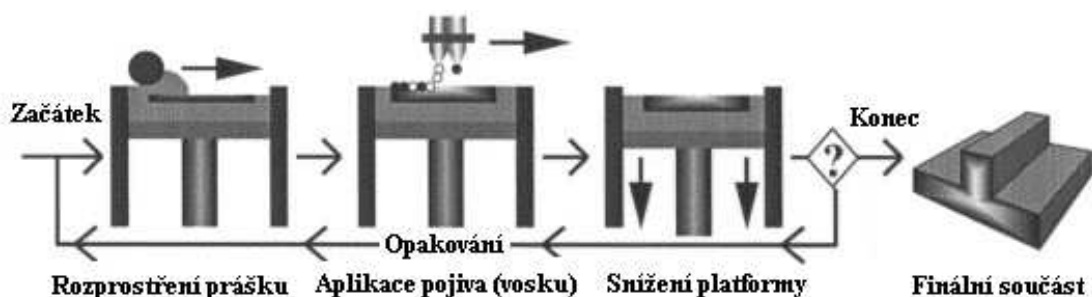
3 VÝROBA MODELŮ

3.1 VÝROBA NETRVALÝCH VOSKOVÝCH MODELŮ

Výroba netrvalých modelů zahrnuje především výrobu modelů polystyrénových a voskových. Technologie pro výrobu obou typů je obdobná, liší se konkrétním uspořádáním zařízení. Kromě toho, jsou vyvíjeny způsoby na výrobu modelů, kterými lze ještě více zkrátit čas potřebný k výrobě prototypového odlitku. Obvykle je přímo zaformován tzv. master model. Úspora času, tak vzniká vynecháním výroby matečné formy.

3.1.1 PŘÍMÁ VÝROBA VOSKOVÝCH MODELŮ METODOU - MULTIJET MODELLING (MJM)

Tato technologie Rapid Prototyping pracuje na obdobném principu jako technologie 3D-tisku. Konstrukční uspořádání tiskové hlavy je řešeno tak, že je osazena 352 tryskami a rozložením obsahuje celou šíři platformy. Tisková hlava se nad podložkou pohybuje pouze v lineárním směru. Tisk probíhá tak, že každá tryska, nezávisle na ostatních, má programově určeno kdy má tisknout. Po vytištění dané vrstvy se platforma posune o zadanou tloušťku níže a znovu je na ní rozprostřen práškový materiál, celý proces se opakuje. Metoda MJM může pracovat mnoha druhy vosků, s teplotou tání v rozsahu 20-130°C Tato metoda je velmi rychlá v porovnání s ostatními. Výsledné voskové modely vynikají dobrým pochem a dobrou rozměrovou přesností. Výhodou této technologie je také její netoxičnost, tichý chod a provoz bez zápachu. Zařízení tedy může být umístěno v kancelářských prostorách. [8][36][37]



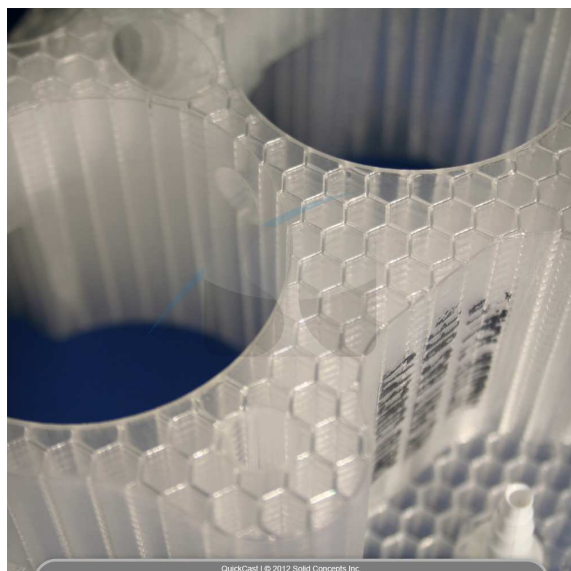
Obr. 16 Princip technologie Multi Jet Modelling[38]



3.1.2 VÝROBA VYTAVITELNÉHO MODELU STEREOLITOGRAFIÍ - METODA QUICKCAST

Metoda QuickCast je velmi podobná metodě lití na vytavitelný model. Na rozdíl od této metody spočívá princip QuickCast v zaformování přímo stereolitografického modelu. Výhodou metody je možnost zkrácení času potřebného na vyrobení prototypového voskového modelu, resp. odlitku. Výhody této metody jsou znatelné, zejména při potřebě výroby několika kusů, či výroby množství kusů s tím, že výroba dále nebude pokračovat. Vyrábět lze jednoduché, ale i velmi přesné a tvarově komplikované součásti.

Modely vytvořené metodou QuickCast mají voštinovou strukturu, podobají se včelím plástvím. Povrch kopíruje tvar součásti. Postup formování je pak obdobný jako u klasických voskových modelů. K odstranění modelu z formy dochází při vypalování keramické skořepiny, pryskyřice po zahřátí vyteče. Do vytvrzené formy je možné odlévat kov.



Obr. 17 Detail voštinové struktury modelu[39]



Obr. 18 Ukázka součásti vyrobené metodou QuickCast[40]

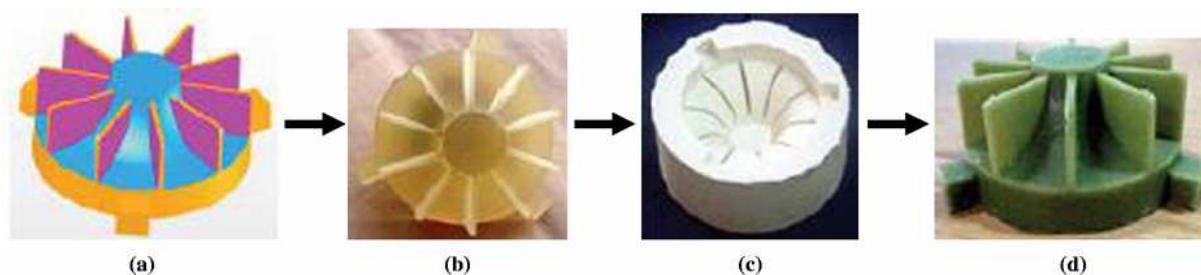
Tato metoda je uplatňována v řadě průmyslových odvětví. Příkladem může být medicínské využití, kde je třeba vysoké přesnosti a kvality povrchu. Konkrétní oblastí využívající metody QuickCast je výroba kloubních náhrad. V tomto oboru je nutné v každém případě vyrobit originální tvar pro každý kloub. Využitím této metody a dat získaných z tomografického vyšetření, může být náhrada vyrobena do 2-3 týdnů. Pro kusovou, či mini-sériovou výrobu jako je tato, je metoda QuickCast velmi vhodná. Značnou nevýhodou metody je, ale její vysoká cena.[41][42]

3.1.3 VÝROBA VOSKOVÉHO MODELU POMOCÍ SILIKONOVÉ FORMY

Využitím silikonových forem je vyplněno místo mezi kusovou výrobou prototypových modelů součástí a velkosériovou produkcí voskových modelů, určenou pro hromadnou výrobu. Samotná výroba silikonové formy je podmíněna existencí tzv. matečného modelu, což je přesná kopie budoucí součásti obvykle z jiného materiálu než skutečný výrobek. Velmi často jsou k výrobě matečného modelu využívány technologie Rapid Prototyping. Je třeba aby výsledný matečný model splňoval určité kvalitativní požadavky. To znamená dobrá rozměrová přesnost a dobrý povrch. Silikonové formy velmi dobře přenášejí i drobné detaily povrchu, tzn. jaký je povrch matečného modelu, takový povrch budou mít voskové modely, resp. budoucí odlitky. Tyto požadavky dobře splňují např.: technologie FDM, nebo SLA.

Výroba silikonové formy začíná vytvořením master modelu obvykle technologií Rapid Prototyping, např.: FDM, SLA. Tento master model je dokončen např.: kytováním nebo broušením, tak aby splňoval požadavky na kvalitu povrchu. A je umístěn do rámečku na výrobu silikonové formy. Do formy s umístěným master modelem je pak nalit silikonový materiál. Materiál je před naléváním vakuově zbaven vzduchových bublinek a poté je jím zalit master model ve formě. Takto odlitou silikonovou formu je třeba nechat vyzrát, to se projeví tak, že "zgumovatí", Takto vznikne dvoudílná silikonová forma do které je možné odlévat tekutý vosk. To je obvykle prováděno ve vakuu. Odlévání může být prováděno ručně, forma však může být umístěna i na vstřikolis. Při použití na vstřikolis je nutné upravit parametry vstřikování.

Výroba silikonových forem s využitím master modelu vyprodukovaného některou RP technologií, představuje poměrně rychlý proces. Díky tomu je možná pružná reakce na požadavky zákazníka (změny v konstrukci, atd.). [43][44]



Obr. 19 Vznik silikonové formy a) 3D CAD model, b) pryskyřicový SLA model, c) silikonová forma, d) voskový model vyrobený pomocí silikonové formy[45]

3.1.4 VÝROBA PRYSKYŘICOVÝCH FOREM PRO VÝROBU VOSKOVÝCH MODELŮ

PŘÍMÁ VÝROBA PRYSKYŘICOVÉ FORMY

K výrobě voskových modelů může být použita také metoda, při které je stereolitografickou technologií vyroben stereolitografický negativ budoucí součásti, nebo-li stereolitografická dutina. Tato forma je v dalších krocích vybavena systémem chlazení a zalita z vnější strany pryskyřicí. Protože je pryskyřice izolujícím materiálem a špatně vede teplo, je možné vstříkovat materiál o nižší teplotě. Zároveň má ale hladký povrch a umožňuje tak dobrou zabíhavost tekutého materiálu. Tímto procesem se výrazně zkracuje čas pro přípravu výroby voskových modelů. Nevýhodou je náchylnost k poškození, tudíž je nutný jemnější způsob zacházení, tj. jemnější pracovní podmínky. Takováto forma je schopna výroby až 100ks na jednu formu.



Obr. 20 Příklad výroby formy s chlazením a uložení formy do ocelového rámečku pro vložení do vstříkolisu[46]

NEPŘÍMÁ VÝROBA PRYSKYŘICOVÉ FORMY

Nepřímou výrobou pryskyřicové formy, je využití stereolitografického modelu "master modelu", s potřebnou povrchovou úpravou, rozděleného na poloviny, pomocí dělicí roviny. Každá polovina master modelu je umístěna do formovacího rámu a zalita směsí pryskyřice a plniva. Směs pro zalití je tvořena epoxidovou pryskyřicí a kovovým plnivem, které zvyšuje mechanickou odolnost formy a zlepšuje její tepelné vlastnosti. Tato forma je vhodná pro použití na vstříkolisu a to jak pro automatickou výrobu, tak pro manuální způsob výroby. Příklady zde uvedené jsou demonstrovány na stereolitografii, ale pro většinu níže popsaných postupů je možné použít i jiných metod Rapid Prototyping, které dosahují požadovaných kvalitativních vlastností.[47][48]



3.1.5 VÝROBA SPALITELNÝCH MODELŮ VYROBENÝCH METODOU FDM

Technologie FDM (Fused Deposition Modelling) vytváří danou vrstvu skládáním tenkého vlákna nataveného materiálu. Používaný materiál, termoplast, je dodáván ve formě drátu. Je přidáván ze zásobní cívky, do pohyblivé pracovní hlavy. Průběžným ohřevem je docíleno toho, že než materiál vstoupí do trysky má teplotu o 1°C vyšší než je jeho teplota tání. Do trysky vstupuje v nataveném, kašovitém stavu. Průchodem tryskou vzniká tenké vlákno, které po položení na předchozí materiál velmi rychle tuhne. Výhodou této metody je použití netoxických materiálů, tzn. může být umístěna v kancelářských prostorách.

K produkci spalitelných modelů metodou FDM, jsou používány materiály s vhodnými vlastnostmi, při vyhořívání. Konkrétními materiály jsou z kategorie ABS plastů.

- ABS (legacy)
- ABSplus
- ABS M-30

Další materiály, pro výrobu spalitelných modelů pomocí metody FDM, nebyly prozatím odzkoušeny. Po vyrobení potřebného množství modelů, jsou namočeny do rozpouštědla, což způsobí vyhlazení povrchu. Hotové modely jsou umísťovány na vtokový stromeček pomocí voskových článků. Následuje obvyklá výroba skořepinové formy máčením v keramické břěcce. Rozdíl oproti voskovému modelu, je při vytavování, které probíhá ve dvou fázích. V první fázi je rozpuštěna vosková vtoková soustava, a ve druhé jsou vypáleny samotné FDM modely. Druhá fáze probíhá při cca 870°C. Dále je forma vypálena, a lze do ní odlévat kov.[49]



Obr. 21 Příklad součásti vyrobené přesným litím a ukázka použitého FDM modelu s voskovým spojovacím článkem[49]



3.2 VÝROBA NETRVALÝCH MODELŮ POLYSTYRENOVÝCH

Výroba polystyrénových modelů pro metody lití na vypařitelný (spalitelný) model, je v drtivé většině prováděna ručně, nebo CNC obráběním z bloku polystyrenu. Často jsou také používány permanentní vstřikovací formy, ve kterých je kuličkový polotovar expandován pomocí horké páry.

3.2.1 VÝROBA POLYSTYRENOVÉHO MODELU LASEROVÝM SLINOVÁNÍM - PRIMECAST

Metoda PrimeCast je další variantou metod založených na spékání materiálu laserovým paprskem, pocházející z produkce firmy EOS. V tomto případě jde o variantu označovanou písmenem P, jako Plastic. Výroba polystyrénového modelového zařízení je možná pomocí materiálu PrimeCast 101. PrimeCast 101 je práškový materiál šedé barvy, vyvinutý na bázi polystyrenů. Tento materiál je přímo určen k využití v oblasti lití na spalitelný (vypařitelný) model. Materiál je určen pro výrobu modelů pro formování do keramických a sádrových forem. Při jeho spalování nezůstávají ve skořepině žádné zbytky. Při použití materiálu na stavbu master modelu, je doporučeno ho napustit epoxidovou pryskyřicí.[50]

Zařízením určeným pro práci s tímto materiálem je FORMIGA P100 vyrobená firmou EOS. Stroj je určen pro přímou výrobu modelů ze 3D dat. Využívány jsou materiály na bázi polyamidů a polystyrenů. Je určené k výrobě kusových, nebo malosériových výrobků s komplexní geometrií. Tyto díly nacházejí uplatnění ve výrobě lékařských nástrojů, a ve vakuovém a přesném lití.



Obr. 22 Polystyrénový model vyrobený slinováním[3]



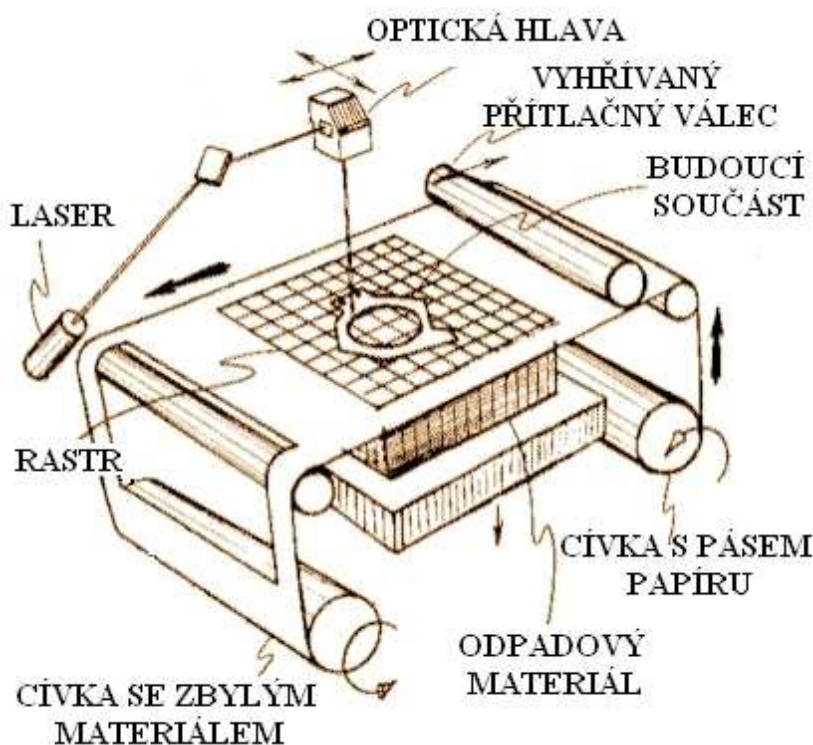
Obr. 23 Zařízení pro výrobu slinutých polystyrénových modelů[11]

3.3 VÝROBA TRVALÝCH MODELŮ

3.3.1 VÝROBA TRVALÝCH MODELŮ METODOU LAMINATED OBJECT MANUFACTURING

Tato technologie Rapid Prototyping je využívána pro výrobu modelů, sloužících k formování pískových forem. Význam této technologie je, v porovnání s ostatními, v jejím relativně levném provozu a rychlosti výroby. To se projevuje zejména při výrobě rozměrných součástí. Tyto výhody vznikají na základě jednoduššího principu výroby, kdy model vzniká přidáváním vrstev papíru s lepidlem a vyříznutím příslušného obrysu do každé vrstvy. Při výrobě odpadá nutnost zpevnit (vytvdřit) plochu obrysem ohraničenou, tím dochází k úspoře času a výrobních nákladů. V praxi jsou modely vytvořené metodou LOM, náhradou za modely dřevěné, většinou ručně vyráběné. Vzhledově jsou dřevu i podobné.

Celé zařízení se podobá kinofilmovému fotoaparátu, dvě cívky, mezi nimiž je natažený papírový pás. Jedna cívka slouží jako zásobník materiálu a druhá jako úložiště použitého materiálu. Velmi těsně pod napnutým pásem je pohyblivý pracovní stůl, nad platformou je umístěn pohyblivý, vyhřívaný válec, který slouží k "zažehlování" vrstev papíru k sobě. Ještě výš nad papírem je pohyblivá optická hlava laseru.



Obr. 24 Schéma metody LOM[52]



Vrstva papíru je přítlačným válcem "zažehlena" k vrstvě předchozí. Nastavením rychlosti, tlaku a teploty válce je zajištěno dokonalé spojení vrstev papíru. Laserovým paprskem je do papíru vypálen průřez polotovaru, příslušný dané vrstvě. Dále je okolo laserem opsán (vypálen) obdélník, tvar pohyblivé platformy, a materiál mezi obrysem součásti a obrysem rastrově rozřezán. Tento odpadový materiál, slouží jako podložka k nalepení další vrstvy papíru. Po skončení vypalování je platforma posunuta o tloušťku vrstvy níže a zbylý použitý materiál je převinut na odpadovou cívku. Současně je nad platformou nastavena nová část materiálu. Tento průběh je opakován tak dlouho, dokud není součást dohotovena. Po skončení procesu výroby, je ze stroje vyjmut kvádr materiálů. Uvnitř vložená součást je obklopena odpadovým materiálem, tvořícím kvádr. Tento odpad je nutné odstranit ručně. K vypalování je užíván CO₂ laser o výkonu cca 25-50W. Použita může být tloušťka materiálu od 0,08-0,25mm. Jako polotovarový materiál je používán hlavně papír, lze ale použít i tenké plastové nebo kovové folie. Velikost pracovního prostoru je cca 810x550x500mm (délka x šířka x výška).[51][52]



Obr. 25 Příklady modelů vyrobených metodou LOM[1]

3.3.2 VÝROBA TRVALÝCH MODELŮ METODOU FDM

Výroba trvalých modelů je možná také metodou FDM. Tyto modely jsou používány k formování v oblasti odlévání do pískových forem formovaných klasickými postupy. Obvykle se toto modelové zařízení vyrábí ručně ze dřeva, což je časově náročný proces. Možnost jeho zkrácení tedy nabízí využití této metody Rapid Prototyping. Součásti jsou stavěny přímo podle počítačových dat, tzn. není tedy nutné připravovat výkresovou dokumentaci pro ruční výrobu. Dále je čas šetřen tím, že materiál pro výrobu není klasické dřevo, tudíž není třeba polotovary klížit sušit apod. Modelové zařízení vyrobené z ABS plastu nepodléhá povětrnostním podmínkám tolik jako dřevo a není tedy tak náročné na skladovací prostředí jako dřevěné modely. Stavba metodou FDM probíhá tak, že je pracovní tryskou vytlačováno tenké vlákno nataveného plastu. Z těchto vláken je postupně postavena celá součást. Materiál k trysce je dodáván v podobě drátu a před vstupem do trysky je materiál ohříván na teplotu o cca 1°C vyšší než je jeho teplota tavení, tzn. je v kašovitém stavu. Tloušťka vlákna je závislá na průměru trysky obvykle je však 0,2mm. Poté stavební podložka klesne o tloušťku vrstvy níže a proces se opakuje. V případě, že je potřeba část modelu při stavbě podepřít, je stavěna i podpůrná konstrukce z materiálu jiného složení. Tento podpůrný materiál je pak odstraněn. Obdobně jako u dalších metod RP je možné touto metodou stavět modely složitých tvarů.



ZÁVĚR

Tato bakalářská práce je zaměřena na přehled možností moderních technologií využitelných při výrobě prototypových odlitků. V současné době v tomto i jiných oborech prototypování expandují technologie Rapid Prototyping. Tyto technologie jsou sice vyvíjeny už od osmdesátých let minulého století, postupným vývojem jsou zdokonalovány a s rostoucí výrobou se stávají i cenově dostupnějšími. Vývojem a výrobou těchto zařízení se zabývá velké množství společností po celém světě. Jsou využívány řadou firem v různých oblastech průmyslu jako jsou slévárnictví, designérství, medicínské nástroje, dopravní prostředky, tvorba spotřebních výrobků a další.

Tato práce je hlavně zaměřena na využití metod rychlého prototypování ve slévárnictví. To zahrnuje, jak přímé využití k výrobě odlitků, např.: trvalé modely vyrobené pomocí FDM nebo LOM metody, nebo přímá výroba forem metodami SLS, DSPC, DMLS, atd.. Stejně tak využití nepřímé kdy jsou vyráběna zařízení a nástroje pro výrobu netrvalých modelů. Tato oblast má v současné době velký význam, neboť oblast přesného lití je velmi často využívána např. ve výrobě dopravních prostředků.

Bakalářská práce je členěna na několik kapitol. V úvodu jsou popsány principy technologií Rapid Prototyping. Dále jsou popsány tři kroky postupu výroby modelové součásti. Tyto kroky lze charakterizovat jako přípravu, samotnou stavbu modelu a dokončovací práce (preprocessing, processing, postprocessing).

Dále jsou kapitoly členěny na oblasti využití technologií, tedy na využití technologií Rapid Prototyping při výrobě forem. Popsána je přímá výroba forem, kdy jsou produkovány formy přímo z elektronických dat. V této oblasti jsou zastoupeny například metody SLS a DSPC. V další části je popsána nepřímá výroba forem a jejich využití, sem jsou zařazena metody vyžívající vytavitelný voskový model, tzn. přesné lití a metody využívající spalitelný (vypařitelný) model z polystyrénu. Jmenovitě jsou to metody Lost Foam, Full Mold a Replicast, všechny jsou založeny na obdobném principu, liší se v detailech v průběhu výroby. Dále je popsáno několik metod používaných pro výrobu netrvalých modelů (vosk, polystyrén, pryskyřice, ABS plast). Popsány jsou jak metody pro přípravu sériové výroby, tak pro výrobu pouze prototypových modelů, případně malé ověřovací série. V poslední části jsou popsány metody pro výrobu trvalých modelů. Trvalými modely je možné nahradit ruční práci při jejich výrobě. To jsou metody LOM a FDM. Metoda LOM je schopná vyrobit modely s obdobnými vlastnostmi, jako mají modely dřevěné. Metodou FDM jsou pak vyrobeny modely z termoplastických materiálů.

Ve slévárnictví je možné použití téměř všech metod rychlého prototypování. Mnoho z nich bylo přímo vyvíjeno pro slévárenské účely. Avšak vývoj se dnes zaměřuje i na jiné oblasti využití jako např. využití v designových studiích. V současné době se vývoj soustřeďuje především na materiály. Zvyšuje se okruh použitelných materiálů a jsou zlepšovány vlastnosti materiálů stávajících.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Foundry Research Institute: Centre of Rapid Prototyping. [online]. [cit. 2012-10-09]. Dostupné z: <http://www.iod.krakow.pl/csp/angielska/lom-pl-galeria.html>
- [2] MAREŠ, Martin a Otakar HOREJŠ. Stroje pro rychlé prototypování. [online]. [cit. 2012-08-09]. Dostupné z: http://www.czspos.cz/akce/20100225.emo2009/10_stroje_pro_rychle_prototypovani.pdf
- [3] JACKSON, Stuart. Laser Sintering of Patterns, moulds and parts. In: [online]. [cit. 2012-09-09]. Dostupné z: <http://additivemanufacturing.org/publications.htm>
- [4] Rapid Prototyping Primer. PENNSTATE. [online]. [cit. 2012-09-09]. Dostupné z: <http://www.me.psu.edu/lamancusa/rapidpro/primer/chapter2.htm>
- [5] Rapid Prototyping (RP): Příručka pro výuku. [online]. [cit. 2012-09-09]. Dostupné z: <http://www.spszr.cz/projekty/plm/rp2012.pdf>
- [6] UNIVERSITY OF WROCLAW. Mechatronika Modul 9: Rychlé vytváření prototypů. Poland, 89 s. Dostupné z: <http://www.adameurope.eu/prj/3810/prd/1/7/Modul%209%20Tschechisch%20komplett.pdf>
- [7] HACKER-MODEL. *Rapid Prototyping: 3D tisk* [online]. [cit. 2012-09-09]. Dostupné z: <http://www.hacker-model.com/cz/rapid.html>
- [8] CHUA, Chee Kai, Kah Fai LEONG a Chu Sing LIM. *Rapid prototyping: principles and applications* [online]. 3rd ed. New Jersey: World Scientific, c2010, xxv, 420 p. [cit. 2012-10-09]. ISBN 13 978-981-277-897-0. Dostupné z: http://books.google.cz/books?id=4OYcyiDUpsQC&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbg_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- [9] *VG Kunststofftechnik GmbH: Prototypen Partner* [online]. [cit. 2012-10-10]. Dostupné z: <http://www.vg-kunst.de/en/information/dictionary/dictionary.html>
- [10] National University of Singapore: Direct Laser Sintering of Silica Sand. [online]. [cit. 2012-10-09]. Dostupné z: http://www.eng.nus.edu.sg/EResnews/0210/rd/rd_11.html
- [11] EOS.info: Material for sand systems. [online]. [cit. 2012-10-08]. Dostupné z: <http://www.eos.info/en/products/materials/materials-for-sand-systems.html>
- [12] Engineer's Handbook: Direct Shell Production Casting - DSPC. [online]. [cit. 2012-10-08]. Dostupné z: <http://www.engineershandbook.com/RapidPrototyping/dspert.htm>
- [13] Science Direct: Rapid tooling: the state of the art. [online]. [cit. 2012-10-08]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013600006130>
- [14] WATERMAN, P. J. Desktop Engineering: Rapid Parts Move into the Mainstream. [online]. [cit. 2012-10-08]. Dostupné z: <http://www.deskeng.com/articles/aaaamy.htm>



- [15] Ruger Investment Casting. [online]. [cit.2012-10-08]. Dostupné z: <http://www.ruger.com/casting/P-Overview.html>
- [16] The Bimac Corporation: Investment Castings&Ceramic Mold Castings from Bimac. [online]. [cit. 2012-10-08]. Dostupné z: http://www.bimac.com/investment_castings_overview.php
- [17] Custompartnet.com: Investment casting. [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/investment-casting>
- [18] Castingreps.com: Investment casting. [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: <http://www.castingreps.com/casting/investment-castings.aspx>
- [19] Industrialmetalcastings.com: Full mold casting. [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: http://www.industrialmetalcastings.com/casting_full_mold_casting.html
- [20] Kimuragrp.co.jp: History of Full Mold Casting Process. [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: <http://www.kimuragrp.co.jp/English/casting/index2.html>
- [21] Espint.com: Lost foam process. [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: <http://www.espint.com/engineering/best-fit-manufacturing-practices/lost-foam-casting.aspx>
- [22] Aluminiumindustry.org: Lost foam proces. [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: <http://www.aluminiumindustry.org/en/lost-foam-process.html>
- [23] Industrialmetalcastings.com: Lost foam casting. [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: http://www.industrialmetalcastings.com/casting_lost_foam_casting.html
- [24] Foundry.vin.com: woodson. [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: <http://www.foundry.ray-vin.com/woodson/47/lostfoam.htm>
- [25] CastingTechnology.com: Replicast. [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: <http://www.castingstechnology.com/public/services/specialprocesses/scpreplicastmain.asp>
- [26] Morristech.com: DMLS. [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: <http://www.morristech.com/Technologies/?cat=DMLS>
- [27] Quad City Manufacturing Lab: Direct Metal Laser Manufacturing. [online]. [cit. 2012-10-09]. Dostupné z: <http://qcml.org/Equipment-and-Capabilities/Direct-Metal-Laser-Manufacturing.aspx>
- [28] 3trpd.co.uk: Direct Metal Laser Sintering DMLS. [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: <http://www.3trpd.co.uk/dmls/>
- [29] DMLS.cz: Direct Metal Laser Sintering. [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: <http://dmls.cz/>
- [30] Additive3d.com. [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: http://www.additive3d.com/len_int.htm



- [31] Kylestetzip.wordpress.com: Laser Engineered Net Shaping (LENS)/ Direct Metal Deposition (DMD). [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: <http://kylestetzip.wordpress.com/2009/05/20/laser-engineered-net-shaping-lens-direct-metal-deposition-dmd/>
- [32] Sandia.gov: New Releases, Lens. [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: <http://www.sandia.gov/media/lens.htm>
- [33] Factoryoffactories.com: Rapid Prototyping. [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: <http://www.factoryoffactories.com/rapidprotot.htm>
- [34] FUSSELL, P. S. a L. E. WEISS. Steel-Based Sprayed Metal Tooling. [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: <http://utwired.engr.utexas.edu/lff/symposium/proceedingsArchive/pubs/Manuscripts/1990/1990-10-Fussell.pdf>
- [35] Spray formed tooling for rapid manufacture. [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: <http://users.ox.ac.uk/~pgrant/tooling.html>
- [36] Signicast.com: Rapid Prototyping support. [online]. [cit. 2012-10-09]. Dostupné z: http://www.signicast.com/engineering/engineering_support/rapid_prototyping.php
- [37] EFunda.com: Rapid Prototyping. [online]. [cit. 2012-10-09]. Dostupné z: http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/inkjet.cfm
- [38] Diy.blogspot.cz. [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: <http://diy3dp.blogspot.cz/2012/03/koncepcja-cyklu.html>
- [39] SOLIDCONCEPTS. *QuickCast* [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: <https://www.solidconcepts.com/technologies/quickcast/>
- [40] Intech-ind.com: QuickCast. [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: <http://intech-ind.com/quick-cast/>
- [41] TECH, INC: QuickCast (SLA). [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: <http://www.techok.com/quick-cast.html>
- [42] 3Dproparts: QuickCast. [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: <http://www.3dproparts.com/technologies/quickcast>
- [43] 3dprinterscanada.com: Silicone Molding. [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: http://www.3dprinterscanada.com/assets/uploads/ApplicationsPDFs/Silicone_Molding_A4.pdf
- [44] M., Horáček, Charvát O. a Smrčka V. Rychlé voskové modely získané použitím kombinací technologií RP a silikonové formy. 2008, roč. 56, 9-10, s398-404.
- [45] CHHABRA, Munish. Rapid casting solutions: a review. [online]. [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1943592&show=html>



- [46] RAHMATI, Sadegh. Design and Manufacture of a Wax Injection Tool for Investment Casting Using Rapid Tooling. [online]. [cit. 2012-10-12]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1007021409700768#>
- [47] 3DTech: Kovové výrobky Stereolitografie ve slévárenství. [online]. [cit. 2012-10-10]. Dostupné z: <http://www.3dtech.cz/default.asp?language=cs&ion=12>
- [48] Engineerhandsbook: Direct AIM. [online]. [cit. 2012-10-12]. Dostupné z: <http://engineershandbook.com/RapidPrototyping/directaim.htm>
- [49] Techforever.com: Investment Casting with FDM Patterns. SYS-TAG INVESTMENT CASTING. [online]. [cit. 2012-10-12]. Dostupné z: <http://www.techforever.com/userfiles/image/anli/PDF/SYSS-TAG-InvestmentCasting-04-11.pdf>
- [50] EOS.info: PrimeCast 101. [online]. [cit. 2012-10-12]. Dostupné z: <http://www.eos.info/en/products/materials/materials-for-plastic-systems/primecast-101.html>
- [51] About.com: Metal Industry: Laminated Object Manufacturing (LOM). [online]. [cit. 2012-10-12]. Dostupné z: <http://metals.about.com/library/weekly/aa-rp-lom.htm>
- [52] Efunda.com: Laminated Object Manufacturing (LOM). [online]. [cit. 2012-10-12]. Dostupné z: http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/lom.cfm



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

3DP	Three Dimensional Printing
CAD/CAM	Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DSPC	Direct Shell Production Casting
FDM	Fused Deposition Moulding
LOM	Laminated Object Manufacturing
MJM	MultiJet Modelling
RP	Rapid Prototyping
SDU	Shell Design Unit
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Stereolithography Tessellation Language



SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr.1: Příklady možností technologií Rapid Prototyping[1][2][3]
- Obr.2: Model součásti ze 3D dat lze vyrobit za 24 hodin [7]
- Obr.3: Příklad pískové formy vyrobené laserovým slinováním[3][10]
- Obr.4: Principiální schéma metody SLS[9]
- Obr.5: Ukázka pískové formy vyrobené metodou DSPC a výsledné součásti[13][14]
- Obr.6: Ukázka odlitků přesného lití[15]
- Obr.7: Schéma procesu přesného lití [18]
- Obr.8: Schéma lití na spalitelný model, metody Full Mold a Lost Foam[21]
- Obr.9: Ukázka vzniku součásti metodou lití na spalitelný model[24]
- Obr.10: Ukázka součástí vyrobených metodou DMLS[26]
- Obr.11: Schéma metody DMLS[27]
- Obr.12: Schéma zařízení metody LENS[30]
- Obr.13: Příklad dílů vyrobených metodou LENS[32]
- Obr.14: Metal spray tooling[34]
- Obr.15: Součást povrchově pokovená pomocí Metal Spray Tooling[35]
- Obr.16: Princip technologie Multi Jet Modelling[38]
- Obr.17: Detail voštinové struktury modelu[39]
- Obr.18: Ukázka součásti vyrobené metodou QuickCast[40]
- Obr.19: Vznik silikonové formy a) 3D CAD model, b) pryskyřicový SLA model, c) silikonová forma, d) voskový model vyrobený pomocí silikonové formy[45]
- Obr.20: Příklad výroby formy s chlazením a uložení formy do ocelového rámečku pro vložení do vstřikolisu[46]
- Obr.21: Příklad součásti vyrobené přesným litím a ukázka použitého FDM modelu s voskovým spojovacím článkem[49]
- Obr.22: Polystyrenový model vyrobený slinováním[3]
- Obr.23: Zařízení pro výrobu slinutých polystyrénových modelů[11]
- Obr.24: 24 Schéma metody LOM[52]
- Obr.25: Příklady modelů vyrobených metodou LOM[1]